

棄物のリサイクルに関する定量的分析，1995

6) 日本LCA研究会資料，2000

7) アルミ缶リサイクル協会：平成12年度アルミ缶リサイクルフロー，2001

1.1.3 建設構造物のLCI分析

建設分野（土木・建築）において，LCAは主にCO₂排出量やエネルギー消費量を推計するための手法として1990年代半ばごろから研究が進み，現在は実務でも広く使用されるようになってきている。これは，建設構造物（建築物や社会基盤施設<インフラ>）は通常の工業製品と比べて規模が大きく，環境負荷もその分だけ大きくなることもあって，環境負荷の総量削減への取組みが重視され，そのための評価方法が必要となったからである。建設分野に関連する業界・学会によってLCAの実施方法や原単位データの整備が進められ，適用事例も蓄積されてきている。

さらに，設計の違いによる建設段階や供用段階での環境負荷の違いを分析し，環境負荷発生を抑える設計を検討する試みも多数行われている。

そこでここでは，建設構造物を対象としたLCIの特徴や具体的な手法についてまとめるとともに，鉄道システムを対象としたLCIの実例を紹介し，その結果について解釈を試みる。なお，建設分野のLCAに関するより詳細な方法については井村ら¹⁾を参照されたい。

(1) 目的および調査範囲の設定における留意点

製品のLCAと同様に，建設構造物でもGoal and Scope Definitionは最も重要でかつ難しい段階である。以下に，現在一般的に行われている具体的な対処法を示す。

① 調査範囲の設定（データ制約の考慮）

建設構造物は一品生産であり，全く同じものを複数造るということはほとんどありえない。

図1.1.3-1に鉄道の例を示すように，オーダーメイドで段階的に詳細な設計を進め，施工中にも現場の状況に応じて見直しを行うことから，事前と事後で仕様が大きく異なることが普通である。その一方で，交通施設のように大規模で環境影響も大きい場合には，詳細な設計がまだ行われていない計画段階において，詳細データの確定を待たずに環境負荷

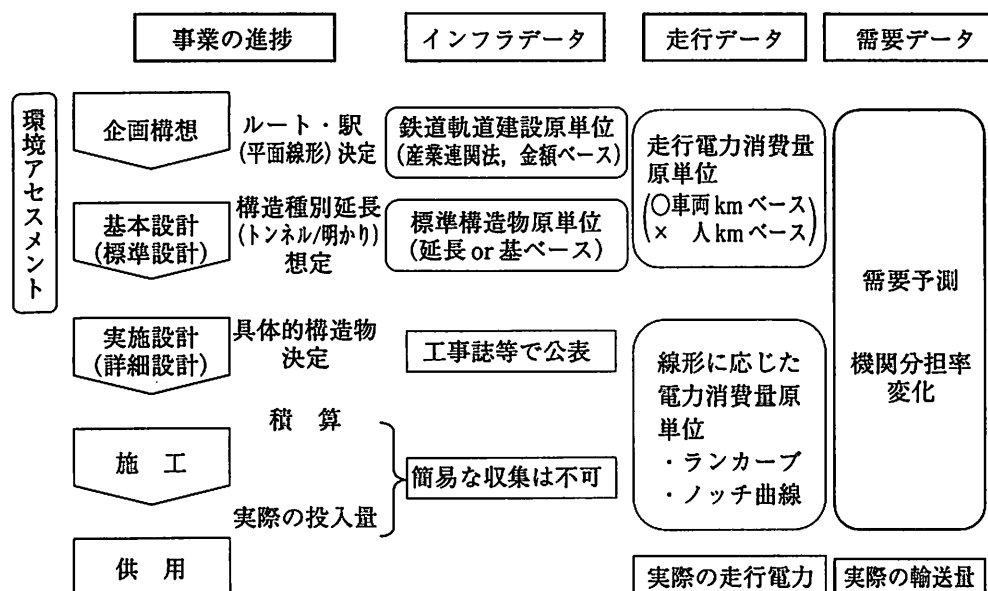


図 1.1.3-1 鉄道システムにおける事業進捗段階と利用可能データとの関係

の概略量が知りたいという場合もある。

供用後のように詳細な設計・利用状況データが得られる場合には、製品 LCI と同様に詳細な積上げ計算を行うことができる。一方、詳細設計図や施工手順に関する情報がないか入手できない段階では、あらかじめ構造物の代表的な構成要素について LCI を実施しておき、その結果を原単位として簡略的に全体の傾向を把握する概略推計法をとる。このように、事業の進捗段階によって詳細 LCI/概略 LCI を使い分けることが考えられる²⁾。

② システム境界の設定

建設構造物の LCA においては、構造物自体および構造物に投入されるあらゆる資材やエネルギーをシステム境界とすることが一般的である。建築物の LCA ではこの設定によって、施工法や使用資材の違いはもとより、ライフサイクルでの光熱・修繕費等の差が環境負荷に及ぼす影響を把握することができ、LCA 適用のメリットは大きい。

一方、インフラに同様のシステム境界を適用する場合、可能な検討は同一機能を有するインフラの投入資材や施工法、維持修繕サイクルのみにとどまってしまうことが多い。もちろんこれだけでも意味はある。しかし、インフラは供用段階において不特定多数の人々に利用されるとともに、周辺社会にも間接的・波及的な影響を及ぼし、結果としてそれらの活動に伴って生じる環境負荷を変化させる。しかし、LCA のシステム境界を上記のように設定する場合、このような環境負荷は評価対象外

となってしまう。その結果、インフラ計画時、すなわち、インフラをどこにどの程度の規模で整備すべきか、性能をどの程度に設定すべきか、あるいはそもそもそのインフラをつくることが環境面から許されるかといった問題に対する適用ができないことになってしまう。この対処の方法に関しては最後に述べる。

(2) インベントリ分析

環境負荷発生量は、システム境界内での各投入物質・エネルギーの投入量と環境負荷発生原単位の積和で求めることができる。そのために、物質・エネルギー投入量の調査と、環境負荷発生原単位の特定化が必要となる。

① プロセスツリーの構築

建築物やインフラ構造物のLCIを実施するためには、その施工・維持管理の各プロセスにおいて環境負荷発生の原因となる行為や対象部材、素材を特定しておく必要がある。このようなプロセスをツリー状に表現したものとして、鉄道橋梁・高架橋の建設段階の例を図1.1.3-2に示す。橋梁は大きく上部工と下部工に分けられ、それぞれがさらに細分化され、最終的には投入される各資材・機材投入までさかのぼる。上部工のうち桁はその材質によって鋼桁・RC（鉄筋コンクリート）桁・PC（プレストレスト・コンクリート）桁の3種類に分けられ、いずれを用いるかによって環境負荷にも影響を与える。このようなプロセスツリーを作図することによって、検討対象のシステム境界内部の活動がすべて網羅されているか、投入資材相互の関係に齟齬がないかどうかのチェックが可能となる。

RC : reinforced concrete

PC : prestressed concrete

② 環境負荷発生原単位と組合せ法

環境負荷発生原単位の設定には、その工程はもとより、投入される資材や建設機械等のライフサイクルにまで遡及して環境負荷発生を含める必要がある。これは内包環境負荷やエコロジカル・リユックスックとよばれるものであり、その計測法には「積上げ法」と「産業連関法」の2種類がある。それぞれの特徴を表1.1.3-1にまとめる。

表1.1.3-1からも明らかなように、二つの方法にはそれぞれ一長一短があることから、建設分野ではこの二つの方法をそれぞれの特性に配慮して併用する「組合せ法」（プロセス法）の適用が大部分を占めてきた（図1.1.3-3）。組合せ法とは、建設構造物において頻繁に使用する資材

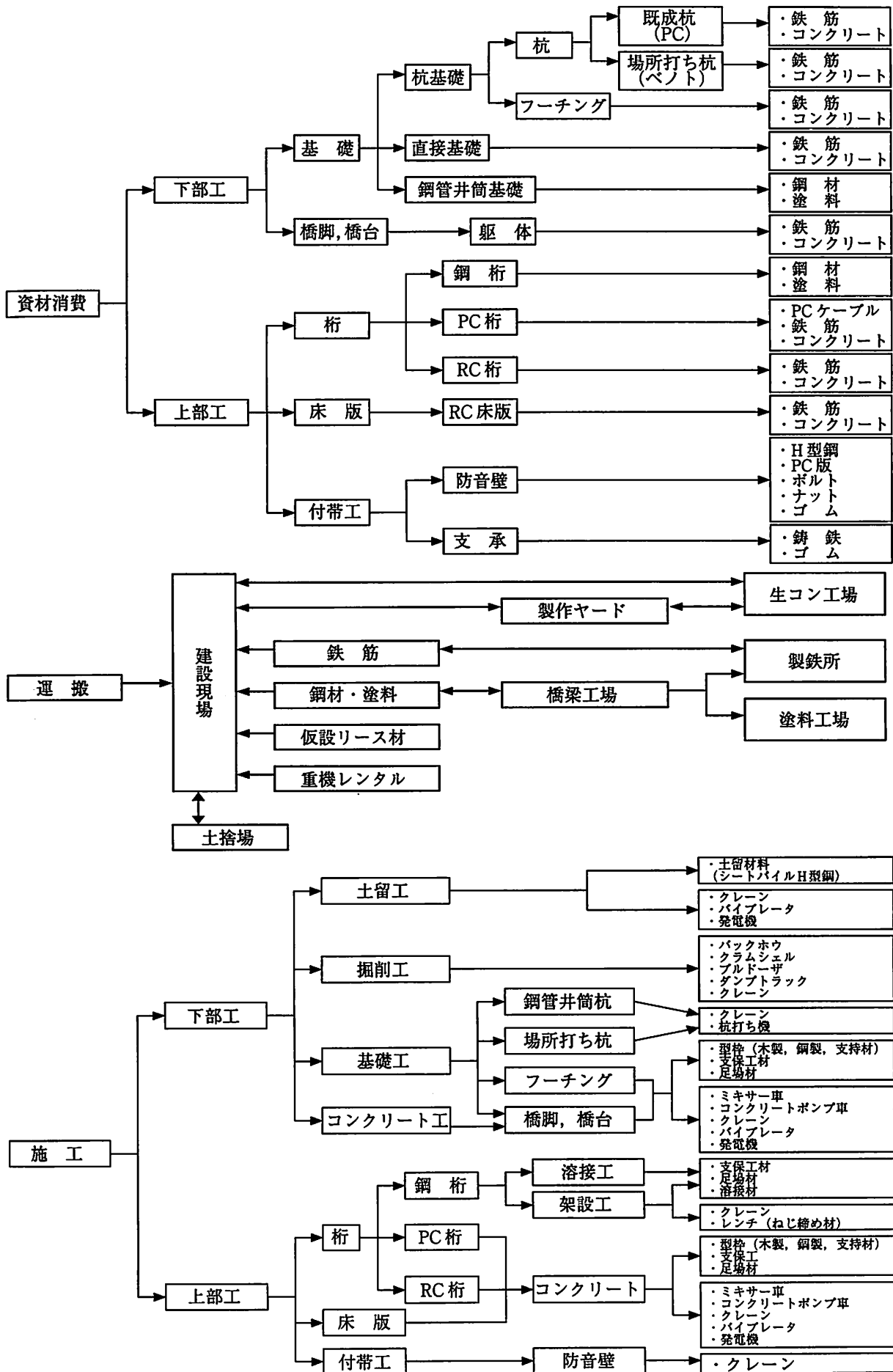


図 1.1.3-2 LCI プロセスツリーの例 (鉄道橋梁・高架橋の建設段階)

表 1.1.3-1 環境負荷発生原単位の算出方法の比較

	産業連関法	積み上げ法
手法	・産業連関表で表現される部門間の取引額を用いて、原材料やエネルギーがどのようにして対象製品に分配されてくるのかをたどる	・個々の原材料ごとに使用量とその生産に伴う環境負荷を詳細に把握し、全工程で積み上げる
長所	・だれでも容易に利用可能 ・内包環境負荷を無限の遡及段階まで推計でき、社会システム全体の環境負荷発生量が把握可能	・任意の原材料・工程を扱うことができ、最新技術導入など詳細な代替案検討が可能 ・データ収集が可能であれば、数値の信頼性も高い
短所	・産業連関表は一般に公表まで5年以上かかり、最新の技術動向が把握できない ・産業連関表の部門分類が粗く、分析の自由度がそれに左右される。たとえば「鉄道軌道建設」という区分では構造形式の区別が不可能 ・産業連関表の値は金額ベースであり、しかも対象地域の平均値であることから、実際の構造物では大きな誤差が生じる	・関係者の協力がなければ十分なデータが得られない ・調査に膨大かつ専門性の高いデータを要し、全工程について質のそろったデータを得るのは困難 ・無限に連鎖する影響のすべてを把握することが不可能なため、過小推計にならざるを得ない

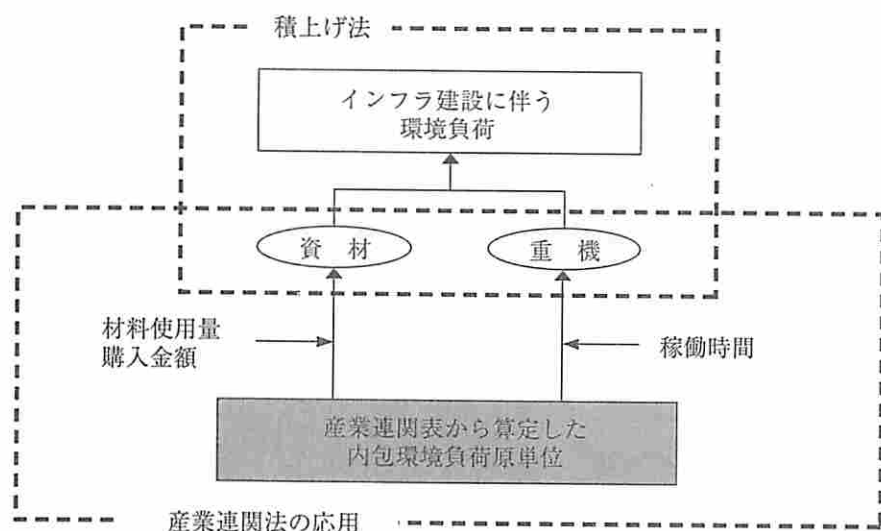


図 1.1.3-3 インフラ建設に伴う内包環境負荷計測方法（組合せ法）

等についてあらかじめ産業連関法や積み上げ法で原単位を求めておき、構造物全体については資材等の投入量を用いて積み上げる方法である。この方法では、建設費等の積算作業における単価を発生原単位に置き換えることによってLCIが可能となることから、実務への適用が比較的容易であるというメリットもある。ただし、積み上げ法と同様、過小推計となることが考えられるため、アウトプットとして総発生量の値の正確さが要求される場合には、別途、産業連関法で求められる値でオーダーの

表 1.1.3-2 建設分野で主に使用されている環境負荷原単位

公表機関	(社)土木学会	(社)日本建築学会	(独)国立環境研究所	(財)電力中央研究所	(社)産業環境管理協会・経済産業省 (LCA データベース)
公表年	1996	2003	2002	2002	2003
産業連関表の年次	1985	1995	1995	1995	—
公表部門数	建設資材・建設機器類など計25分類	516部門 + 建築細分類	399部門 186部門 93部門 32部門	399部門	約250品目
対象環境負荷物質	CO ₂	CO ₂ SO _x NO _x CH ₄ N ₂ O エネルギー	CO ₂ NO _x SO _x SPM エネルギー	CO ₂ CH ₄ N ₂ O エネルギー	CO ₂ , SO _x , NO _x を試験公開 最終的に14物質を目標
単位	負荷量/物量 (kg)	負荷量/千円 および 負荷量/物量	負荷量/百万円	負荷量/百万円 (一部: 負荷量/物量)	負荷量/物量
推計法	積上げ法 (一部産業連関法)	産業連関法	産業連関法	産業連関法	積上げ法
算定段階	生産	○	○	○	品目により さまざま
	流通	—	○	—	
	最終消費	—	○	○	
特徴	土木分野の状況に合わせて設定。 CO ₂ しかなく部門も粗い	部門が細分化され、運搬車両や施工機械も含まれる	日本では最も標準的な原単位であるが、金額ベースなので使いにくい	国立環境研究所の原単位と基本的には同じ方法	参加22工業会+協力依頼34工業会が提供した詳細データを使用した積上げ型原単位

妥当性がチェックされる必要がある。

原単位は複数の機関によって作成・公表されている。そのうち建設分野でよく使用されているものを表1.1.3-2にまとめる。それぞれ異なった値となるのは、公表機関が使用範囲を想定する分野がまちまちであり、その各分野の実態によって推計方法を変えているためである。とくに建設分野については、後述するように建設段階の環境負荷のうちで鋼とコンクリート資材に起因する分が圧倒的な割合を占めるため、これらの原単位を詳細に推計する必要がある。さらにインフラ分野と建築分野では使用する材料が異なる場合も多く、産業連関法で求められるような平均値的な原単位の使用は不適當であるといった事情がある。したがって、

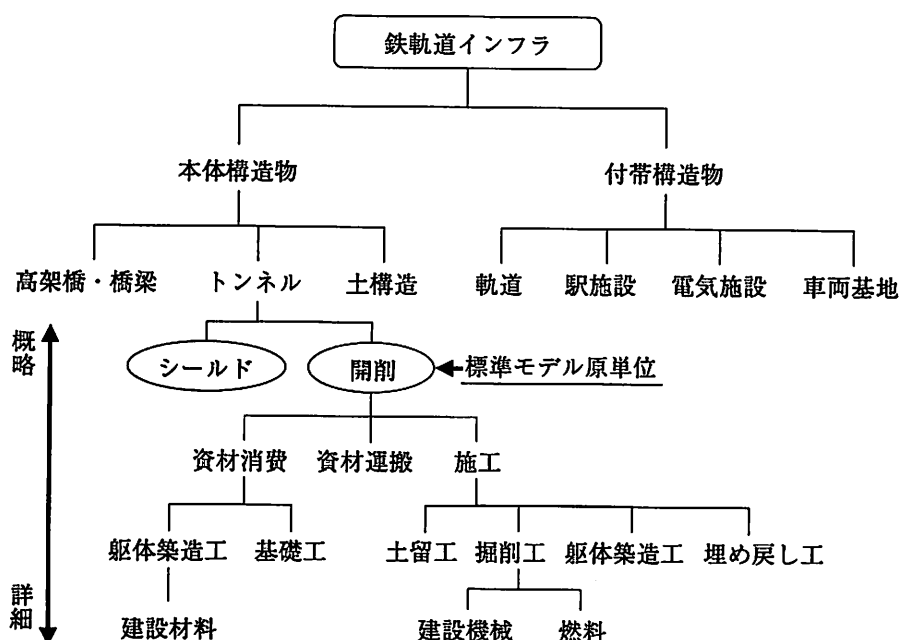


図 1.1.3-4 鉄軌道システム構成要素の分解

基本的には適用する分野にマッチした原単位を使用することが妥当であるといえる。

③ 構成要素の標準化による概略 LCI

鉄道・道路のように、多数のインフラ構造物から一つのシステムを構成している対象について LCA を実施する場合、詳細設計が存在しない計画段階では、データ制約の関係で、表 1.1.3-2 の原単位を用いて推計することは不可能である。また、詳細設計が存在する場合でも、図 1.1.3-4 のように、システムを各構成要素に分解し、それぞれについていくつかの「標準モデル」を設定する。そして、各標準モデルに関して LCI を実施し、それらを再度組み合わせて積和をとることにより、システム全体でのライフサイクル環境負荷を算出するという概略法をとることが考えられる。

(3) 鉄道インフラを対象とした LCI の実例と解釈

具体的な LCI 事例として都市近郊鉄道を取り上げて解説する。

① 構造物の標準モデルの LCI

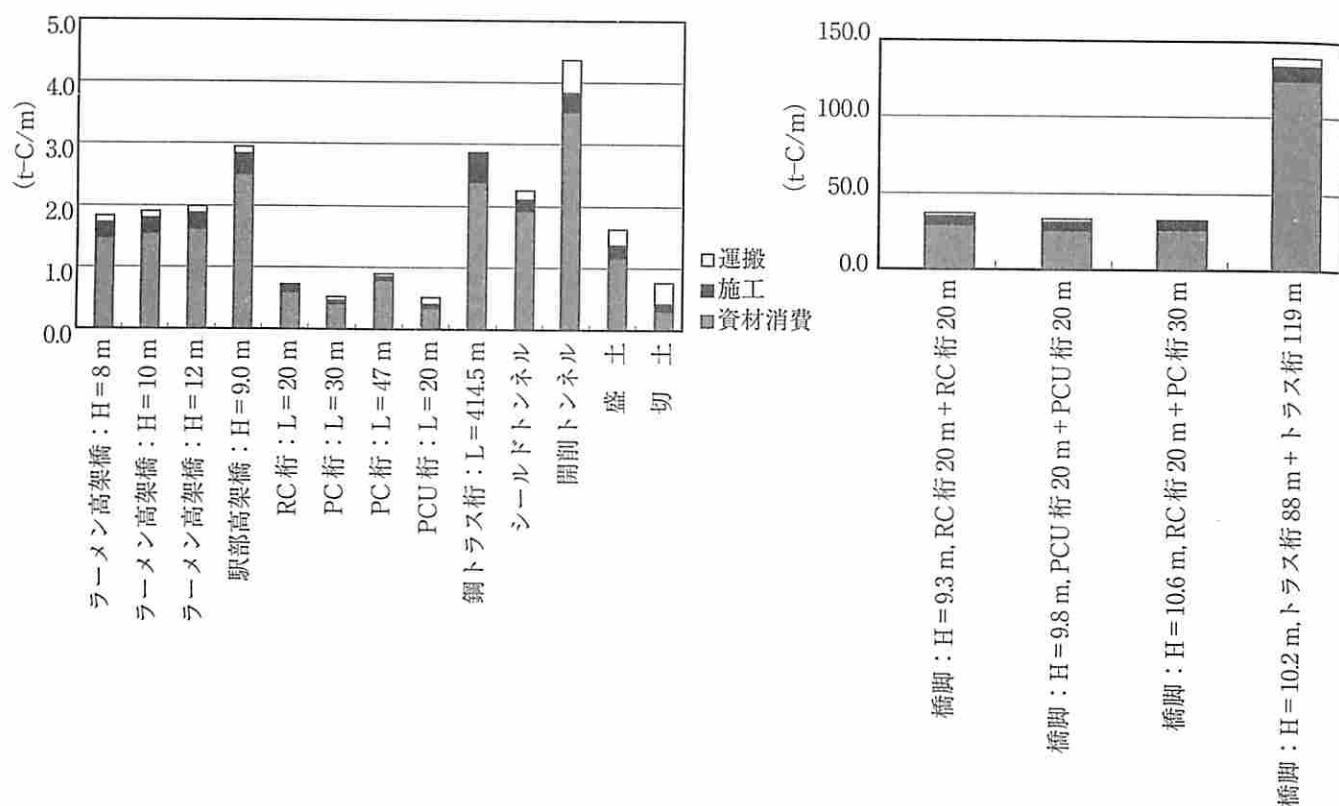
鉄道システムを構成する個別構造物に関する標準モデルの LCI として、著者もかかわって日本鉄道建設公団（現：鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部）関東支社が実施した調査³⁾がある。この結果の一部を示し、LCI 結果の解釈を行う。

表 1.1.3-3 LCI 対象項目一覧

大区分	詳細区分	対応する段階	
本体構造物	橋梁・高架橋	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施 工
	トンネル (山岳/シールド/開削)	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施 工
	土構造物 (盛土/切土)	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施 工
付帯構造物	軌 道 (スラブ/バラスト)	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施 工
		維持・補修段階	
	駅施設 (土木・建築・駅内設備)	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施 工
	電気施設 (電路・変電・信号・通信)	建設段階	資材消費
	車両基地	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施 工
車 両	車両本体	製造段階	資材消費
			加工組立
		運用段階	
		維持・補修段階	
		廃棄段階	

調査の対象となった構成要素の項目を表 1.1.3-3 に示す。多くの項目で建設段階（もちろん投入資材・機械等への遡及分を含む）のみ扱っているが、インフラを対象とした LCI に関する既往研究の多くで、維持管理・廃棄段階の CO₂ 排出量は建設段階に比べ非常に小さいことが指摘されている。

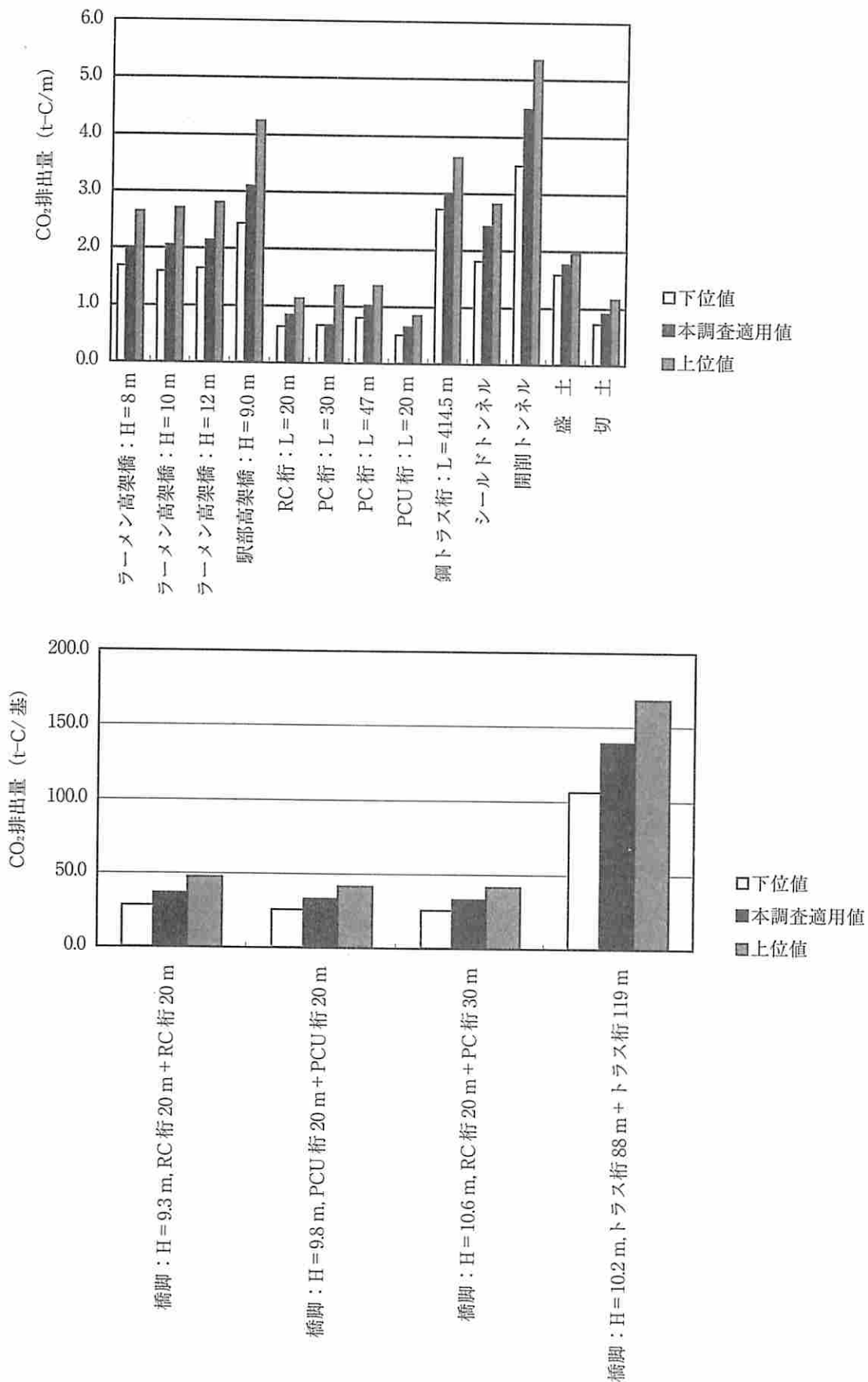
この調査では、LCI は CO₂、NO_x およびエネルギーの 3 種類について実施されている。ここでは CO₂ について扱う。また、CO₂ 原単位には土木学会（1996）が公表した値を使用しているが、その他の原単位を適用した推計も行い、その結果の違いについても考察されている。

図 1.1.3-5 構造形式別の建設段階での CO₂ 排出量 (都市内鉄道)

② 構造形式別の試算結果

本体構造物に関する各構造形式を対象に、建設段階における CO₂ 推計結果を図 1.1.3-5 に示す。これをみると、総排出量に占める資材消費の比率が圧倒的に高いことが分かる。さらに、このうち大多数をコンクリート起源が占めていることから、コンクリート量が CO₂ 排出量を規定する主因であるといえる。したがって、CO₂ 排出量削減にとって最も効果的なのは、CO₂ 排出量の少ないセメントの使用や、なるべくコンクリート量を少なくした構造断面設計であることが結論づけられる。この傾向は他の環境負荷でも同様である。なお、鋼構造物を対象とした場合には、やはり鋼材の使用量が CO₂ 排出量の規定要因となる。

構造形式別の比較では、トンネル・橋梁（桁＋橋脚）が土構造物に比べ多くなっている。これも、コンクリートおよび鋼材の使用量が大きく関係しているためである。トンネルでは開削が 4.5 t-C/m に対してシールドは 2.4 t-C/m となり、開削トンネルのほうが倍近く高い。一方、橋梁に関しては、RC 桁と PC 桁とでほとんど変わらない値となっている。橋脚のスパンを考慮して単位延長当り CO₂ 排出量を推定すると、RC 桁で 2.6 t-C/m、PC 桁で 2.3 t-C/m となって、これはラーメン高架橋 2.0 t-C/m やシールドトンネルと同程度であるが、土工（切土）の 0.9 t

図 1.1.3-6 適用する原単位による CO₂ 推計値の違い (都市内鉄道・本体構造物)

-C/mの倍以上となっている。なお、土工に関しては施工・運搬の比率が相対的に高くなっている。

③ 適用する原単位による推計結果の違い

以上の推計では原単位に土木学会の公表値を使用してきたが、適用する原単位によって値にどの程度の変化が生じるかを確認するために、他の原単位を適用した推計を合わせて行い、推計結果の幅を確認する。その結果を図1.1.3-6に示す。図中で下位値・上位値とは、表1.1.3-2に示した各原単位による推計値のなかで最も値が小さかったものと大きかったものを表す。本研究で適用した土木学会公表値は、下位値と上位値のほぼ中間に位置している。一方、構造物の種類によっては下位値と上位値とで2倍近くの差がある場合もあることが分かる。この差に大きな影響を及ぼしている原因は、CO₂排出量起源のうち大きな割合を占めるコンクリートおよび鋼の原単位の幅である。したがって、精度を高めるためには、コンクリートおよび鋼の原単位について、その推定方法や各種仮定をよく吟味し、場合によってはオリジナルに原単位を作成するなどして対処することが重要であることがいえる。

(4) 概略法を用いた鉄道システムのLCIの実例と解釈^{4,5)}

著者らは、(3)で説明した鉄道インフラのLCI結果を標準モデルとして用いることにより、新規鉄道整備プロジェクトを対象とした概略LCIを複数のケースについて実施している。ここではそのうち大都市部と郊外部を結ぶ60 km 弱の都市近郊鉄道を対象とした推計事例を示す。

① 交通システムへのLCA適用におけるシステム境界

交通インフラの運行方式やルート等を計画する段階においてLCAを適用するためには、システムを構成するインフラや車両を含めてシステ

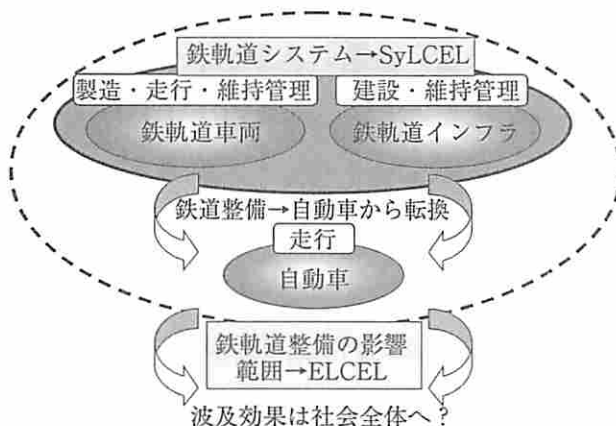


図1.1.3-7 鉄軌道システム LCA のシステム境界

ム境界としてとらえる必要がある。この場合、システムの各構成要素（構造物や車両など）についてLCAを実施するとともに、システムとしてのライフタイム全体で評価するために、そのなかで各構成要素が何世代かにわたって更新される過程も織り込んでおく必要がある。このようにして得られるシステムのライフサイクル環境負荷を“SyLCEL”とよぶことにする。

さらに、交通システム整備によって交通機関分担率や経路配分率などが変化することで、システム外に波及的に生じる環境負荷の変化が無視できない場合には、システム境界をその変化の及ぶ範囲にまで拡張する必要がある（図1.1.3-7）。このときに推計されるライフサイクル環境負荷を「拡張ライフサイクル環境負荷」（ELCEL）とよぶこととする。SyLCELは必ず正の値となるが、ELCELは交通システム整備によって減少することもある。また、これら波及効果の把握にあたっては、交通

SyLCEL : system life
cycle environmental
load

ELCEL : extended life
cycle environmental
load

表 1.1.3-4 鉄道の標準 CO₂ 排出原単位の例⁴⁾

●インフラ本体構造物（建設）		●インフラ付帯構造物（維持補修）	
アーチスラブラーメン高架橋	2.04 t-C/m	レール	3910 kg-C/百万車両 km
RC 桁用橋脚	35.8 t-C/基	架 線	41.4 kg-C/百万車両 km
PC 桁用橋脚	32.2 t-C/基		
トラス桁用橋脚	139 t-C/基	●車両（製造）	
RC 桁	0.85 t-C/m	アルミニウム 20 m 車両	24.9 t-C/両
PC 桁	1.02 t-C/m		
鋼製トラス桁	2.98 t-C/m	●車両（維持補修）	
シールドトンネル	2.41 t-C/m	パンタシュー	5.50 kg-C/百万車両 km
開削トンネル	4.48 t-C/m	ブレーキシュー	144 kg-C/百万車両 km
盛 土	1.77 t-C/m	車輪	1710 kg-C/百万車両 km
切 土	0.88 t-C/m		
●インフラ付帯構造物（建設）		●走行	
スラブ軌道	77.9 kg-C/m	電車電力	0.31 kg-C/車両 km
バラスト軌道	87.8 kg-C/m	付帯施設電力	0.21 kg-C/車両 km
高架駅	1040 t-C/駅		
地下駅	8490 t-C/駅		
車両基地	1670 t-C/箇所		

表 1.1.3-5 構造種別延長と駅数

高架橋	橋 梁	トンネル	土構造	駅 部	合 計	高架駅	地下駅
20 km	3 km	13 km	4 km	18 km	58 km	12 駅	8 駅

工学・交通計画分野で開発されている交通需要予測や交通パフォーマンス評価等の手法を導入することが必要である。また、どこまで「拡張」するかを決めるのは困難であるが、通常の実用的なシステム境界は供用後の代替交通機関分担の変化までを取り上げることであり、ここでもその考え方を適用する。

② 標準モデル原単位と推計時の諸仮定

標準モデルのLCI結果は、表1.1.3-4に示すような延長・駅数当り原単位の形で整備されている³⁾。これを使用して、対象とする都市近郊鉄道のLCIを行う。対象路線の延長・構造種別ごと延長および駅数は表1.1.3-5のように設定する。また、車両の運行段階の試算に必要な運行計画は、対象路線で想定されている計画をそのまま利用している。

③ 鉄道システムのLCCO₂推計結果

以上を用いて、対象とする鉄道のLCCO₂をライフサイクル60年、輸送需要32.7万人/d（類似事例を参考に設定）として算出したところ、図1.1.3-8のようになった。なお、ライフサイクルにわたり技術水準（燃費、電力、効率等）は現状のまま推移し、輸送需要も変化しないとして計算している。LCCO₂は1.11 Mt-C/60年となる。段階別では、走行が約68%と最も大きく、ついでインフラ建設の約22%となっている。この結果より、新規鉄軌道システム整備を環境の面から議論するにあたっては、車両走行分はもとより、インフラも含めたライフサイクル全体を考慮することが、排出量シェアからみても重要であるといえる。

図1.1.3-9は、対象鉄道の各構造形式について延長とCO₂排出量を割合で示したものである。最も延長が大きい構造物は高架橋であり、全体の約1/3を占めているが、CO₂排出では約1/6にすぎない。ここで高架

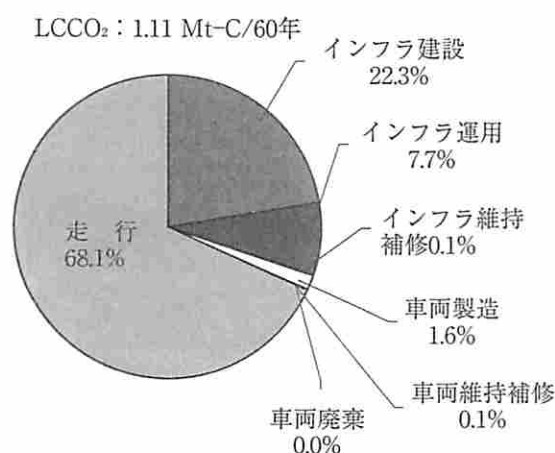
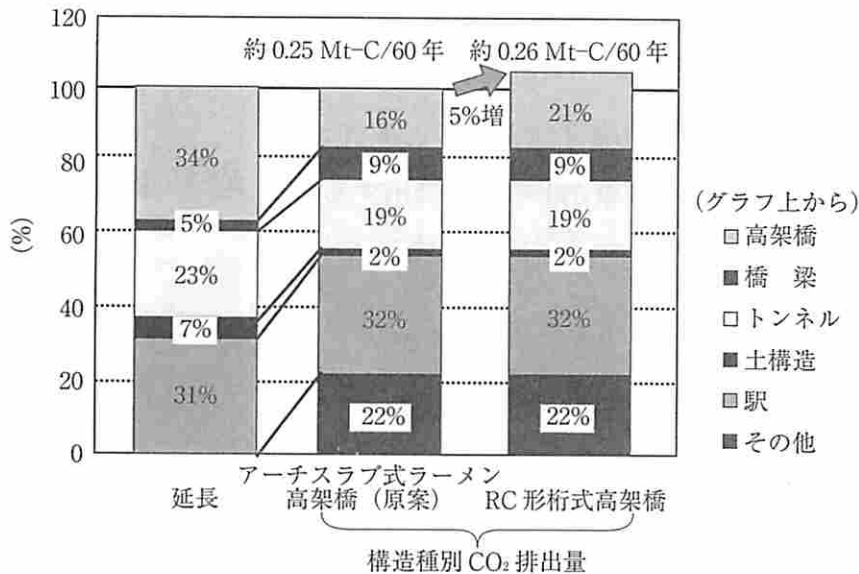


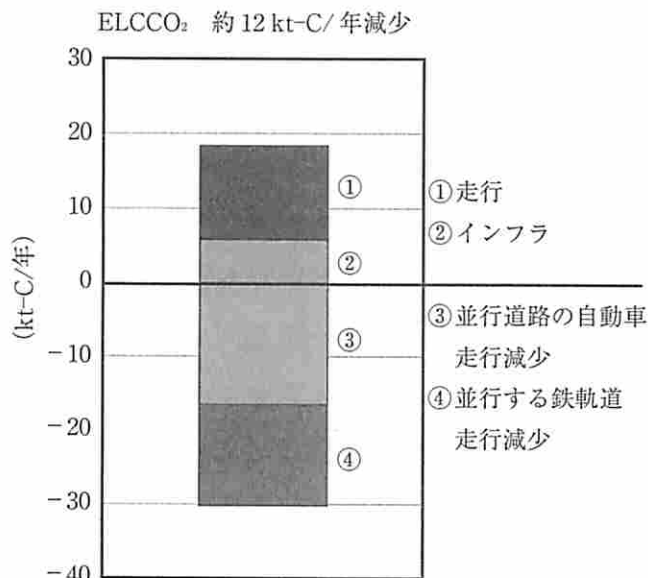
図1.1.3-8 対象鉄道のLCCO₂と各段階別内訳
(ライフサイクル：インフラ60年、車両20年)

図 1.1.3-9 構造種別の延長と LCCO₂

橋に関しては、景観・経済性向上のためにアーチスラブ式ラーメン高架橋が取り入れられることを想定して推計しているが、仮にすべて従来形式のRC桁で整備されるとすると、インフラ部分全体のLCCO₂は5%、全体では1%程度増加すると推計される。このことから、アーチスラブ式ラーメン高架橋導入によってLCCO₂が1%程度削減されていることが分かる。このように、標準的な構造形式をあらかじめ原単位として整備しておくことによって、設計構造の違いがLCCO₂全体にどの程度の差を生じさせるかを事前にチェックすることができる。

④ 整備前後のELCCO₂ (ELCELで評価したCO₂排出量) 変化

類似事例⁶⁾を参考に、対象とする鉄道の整備によって、都市圏全体で

図 1.1.3-10 鉄道整備前後での ELCCO₂ 変化推計結果

自動車交通量および鉄軌道の利用量はともに減少すると想定する。この想定値を基に整備前後でのELCCO₂変化を推計した結果が図1.1.3-10であり、合計で約12 kt-C/年のCO₂排出量削減が見込まれると推計される。これは、並行する高速道路を走行する自動車が1年間に排出する量、約116 kt-C/年（1999年度道路交通センサスから算出）の約10%にあたる量である。

参考文献

- 1) 井村秀文編著：建設のLCA，オーム社，2001
- 2) 伊藤武美，花木啓祐，本多博：ニュータウン建設における二酸化炭素排出量の概略推計方法の検討，環境システム研究，25：379～384，1997
- 3) 日本鉄道建設公団関東支社・（財）運輸政策研究機構：平成13年度環境からみた鉄道整備効果に関する調査報告書，2002
- 4) 加藤博和：交通分野へのライフサイクルアセスメント適用，IATT Review，26(3)：55～62，2001
- 5) 柴原尚希，加藤博和，狩野弘治：LCAに基づく標準化原単位を用いた鉄軌道システムの環境性能評価手法，土木学会第31回環境システム研究論文発表会講演集，p.167～172，2003

1.1.4 肥料——化学肥料/糞尿処理物のLCI分析

ここでは、乳牛糞尿をメタン発酵処理して肥料およびエネルギーとして利用する際の環境負荷を、化学肥料の場合と比較する事例を紹介する。とくに、糞尿処理物では肥料やエネルギー利用状況における機能の設定、化学肥料では硫酸等のバックグラウンドデータの作り方による相違等が結果に及ぼす影響の「解釈」について述べる。

(1) はじめに

① 調査の背景

乳牛糞尿に起因する悪臭や水質汚染等の環境汚染が問題となり、汚染物質を低減化処理して土壌へ還元することが行われてきている。処理段階では電力等のエネルギーを消費するが、乳牛糞尿は肥料成分や有機物を多く含むことから肥料やエネルギー源として利用することが可能¹⁾である（図1.1.4-1）。これらを利用することにより化学肥料やエネルギーの消費が減少し、その生産にかかる環境負荷が軽減される。

乳牛糞尿は畜産廃棄物であり、廃棄物処理により得られた処理物を肥料として利用し、有機物からエネルギー回収・利用する場合の総合的な環境負荷を明らかにすることが今後の環境汚染対策にとって重要となっ